

Численное моделирование процесса высокоградиентной магнитной фильтрации

© Б.А. Гусев,¹ В.Г. Семенов,² В.В. Панчук²

¹ Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова (НИТИ), 188540 Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии, 198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Россия
e-mail: vitran@mail.ru

(Поступило в Редакцию 9 ноября 2015 г.)

Представлены результаты численного моделирования процесса высокоградиентной магнитной фильтрации ультрадисперсных продуктов коррозии из водных теплоносителей. Полученные результаты позволили установить оптимальные технические характеристики высокоградиентных магнитных фильтров. На основании полученных данных разработаны опытные образцы ВГМФ с различными магнитными системами для очистки технологических водных сред атомных энергетических установок от активированных продуктов коррозии.

На формирование радиационных полей от оборудования атомных энергетических установок (АЭУ), независимо от типа и мощности существенное влияние оказывают коррозионные процессы и массоперенос активированных продуктов коррозии (ПК) по первому контуру [1–5]. Появление в теплоносителе активированных продуктов коррозии (АПК) приводит к необходимости их удаления для уменьшения дозовых нагрузок при проведении профилактических и ремонтных работ. В контурах АЭУ в зависимости от водно-химического режима (ВХР) ПК могут присутствовать в виде лепидокрокита (γ -FeOOH), гетита (α -FeOOH), гематита (α -Fe₂O₃), магемита (γ -Fe₂O₃), магнетита (Fe₃O₄), вюститита (FeO) и других оксидов железа, обладающих определенными магнитными свойствами.

В основу разработки процесса высокоградиентной магнитной фильтрации продуктов коррозии положен факт, что любая парамагнитная или ферромагнитная частица продуктов коррозии, помещенная во внешнее магнитное поле с напряженностью H , образует диполь, магнитный момент которого ориентирован вдоль силовых магнитных линий поля [6,7]. Когда диполь находится в градиентном поле, силу, действующую на частицу в объеме фильтра со стороны намагниченных элементов (F_m), можно выразить как

$$F_m = 4/3\pi b^3(\chi_r - \chi_c) \cdot H \cdot dH/dx, \quad (1)$$

где b — радиус частицы; χ_r и χ_c — восприимчивость частицы и среды соответственно; H — величина напряженности внешнего магнитного поля по оси X [8]. Поскольку на частицу ПК в водном потоке действуют различные силы, вероятность ее захвата магнитным полем определяется как результат взаимодействия между магнитными и конкурирующими силами, обусловленными гравитацией, вязкостью, гидродинамикой потока.

При разработке конструкции высокотемпературного магнитного фильтра (ВГМФ) основными проблемами

являются выбор типа и оптимальной конфигурации магнитной системы, обеспечивающей максимальную напряженность магнитного поля, в рабочем объеме фильтра, а также выбор материала и геометрических характеристик ферромагнитной матрицы. Чем сильнее градиент поля, тем больше магнитная сила, действующая на частицу. Наиболее высоких градиентов можно добиться, если совмещать эффекты, приводящие к искажению контура магнитных силовых линий в рабочем объеме магнитного фильтра, как за счет схемы включения магнитов, так и за счет внесения в магнитный зазор концентраторов магнитных силовых линий. Так как градиент магнитного поля обратно пропорционален диаметру элемента концентратора магнитных силовых линий (далее элемента матрицы), при выборе матрицы исходили из того, что наиболее высокие градиенты достигаются на нитевидных ферромагнитных элементах малого радиуса. При выборе конструкции магнитной системы ВГМФ для размещения в составе оборудования атомной или тепловой энергетической установки предпочтение отдано постоянным магнитам из интерметаллида SmCo₅ или NdFeB, поскольку фазовый состав взвесей ПК в теплоносителе постоянен и определяется только водно-химическим режимом. Следует отметить, что объективно существующие технические ограничения на величину максимального значения напряженности магнитного поля и минимальные размеры ферромагнитных матричных элементов напрямую связывают повышение эффективности высокоградиентной магнитной фильтрации с совершенствованием технических характеристик магнитной системы фильтра.

В основу математической модели процесса удерживания частиц продуктов коррозии в магнитном поле положены следующие соображения [8]. Выражение для силы, действующей на парамагнитную или ферромагнитную частицу объемом V , помещенную в среду с намагниченностью M_c , когда переменной является только одна компонента магнитного поля, например, вдоль оси X ,

будет иметь вид

$$F_x = V [M_r(r) - M_c(r)] \cdot dB(r)/dx, \quad (2)$$

где r — точка внутри частицы объема V , M_r — значение намагниченности частицы объема V , $B(r)$ — значение вектора индукции в точке r .

Учитывая, что для среды и частиц в процессе магнитного взаимодействия намагниченность $M(r)$ эквивалентна $\chi \cdot H(r)$, выражение для силы (в точке x или в точке r) будет иметь вид

$$F_x = V(\chi_r - \chi_c) \cdot H(r) \cdot dB(r)/dx, \quad (3)$$

где χ_r и χ_c — восприимчивости частиц и среды соответственно, r — точка в объеме частицы, x — переменная компонента магнитного поля. Здесь сила, действующая на частицу, прямо пропорциональна ее объему.

Реализация максимальной магнитной силы в рабочем объеме ВГМФ определяется условиями формирования градиентов магнитного поля.

Если величина приложенного магнитного поля $H_0 < H_s$, где H_s — индукция насыщения, то зависимость магнитного поля на расстоянии r от оси ферромагнитного матричного элемента радиусом a будет иметь следующий вид:

$$H = H_0 \cdot (1 + a^2/r^2),$$

а выражение для градиента магнитного поля

$$dB/dx = -22B_0 \cdot a^2/r^3. \quad (5)$$

При помещении парамагнитной частицы радиусом b в градиентное магнитное поле, создаваемое ферромагнитным матричным элементом радиуса a , на расстоянии r от центра этого элемента, на нее будет действовать магнитная сила, определяемая выражением

$$F_m = -2/3 \cdot \pi b^3 (\chi_r - \chi_c) \cdot (H_0 + H_0 \cdot a^2/r^2) \cdot B_0 \cdot a^2/r^3. \quad (6)$$

В случае $H_0 > H_s$ зависимость магнитного поля на расстоянии r от оси ферромагнитного матричного элемента радиусом a будет иметь вид

$$H = H_0 + H_s \cdot (a^2/r^2), \quad (7)$$

а выражение для магнитной силы, действующей на частицу, будет иметь вид

$$F_m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 \cdot \chi_r \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}. \quad (8)$$

Максимальное значение для этой силы достигается в случае, когда частица находится в контакте с ферромагнитным матричным элементом:

$$F_{m \max} = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot \chi_r \cdot H_0 \cdot b^3 \cdot a^2}{3(a+b)^3} \cdot \left(1 + \frac{2M}{H_0 \cdot (1+b/a)^2}\right), \quad (9)$$

где M — намагниченность ферромагнитного матричного элемента.

Помимо рассмотренной магнитной силы, на частицу будут действовать конкурирующие силы гравитации, гидродинамической вязкости, трения и инерции. В нашем случае ограничимся приближением, в котором учитываются только силы гравитации и гидродинамической вязкости, так как влияние остальных сил незначительно.

Для сферической частицы радиусом b и плотностью ρ_r гравитационная сила будет равна

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 \cdot (\rho_r - \rho_c) \cdot g, \quad (10)$$

где ρ_c — плотность среды, из которой происходит сепарация, g — ускорение силы тяжести.

Сила гидродинамической вязкости зависит от ряда параметров

$$F_d = 12 \cdot \pi \cdot v \cdot \eta \cdot b. \quad (11)$$

Здесь v — скорость движения частиц относительно потока среды, в которой находятся эти частицы, η — кинематическая вязкость жидкости, b — радиус частиц. Выражение применимо, когда относительная скорость движения частиц и их диаметр не превышают условия Стокса.

Анализ поведения конкурирующих сил позволяет сделать вывод, что для очень малых частиц определяющей силой является гидродинамическая вязкость, а для крупных — сила гравитации. Магнитные силы для частиц с различными магнитными свойствами преобладают в своем характерном для каждого класса частиц диапазоне размеров.

Рассмотренный подход положен в основу разработки программного обеспечения для моделирования процесса высокоградиентной магнитной фильтрации с учетом фазового и дисперсного составов ПК, типа и параметров магнитной системы. В программу заложена возможность расчета параметров магнитных систем, основанных на различных способах создания высокоградиентного магнитного поля. Для определения необходимых параметров магнитной системы разработан расчетный код „MagFiltr“, позволяющий проводить расчет вероятности удержания ВГМФ частиц широкого спектра фазового и дисперсного составов с учетом свойств применяемых материалов и заданного типа магнитной системы. Высокоградиентное магнитное поле в данной модели создается элементами матрицы, помещенными в рабочий объем, через который проходит среда, содержащая удерживаемые частицы. Элементы матрицы представлены в виде ферромагнитных сферически-симметричных частиц или тонких нитей, расположенных равноудаленно друг от друга. Окружающее матрицу магнитное поле создается постоянными магнитами, расположенными вне или внутри рабочего объема. По взаимному расположению магнитов системы разделяются на два типа: с последовательным ($S-N$) и встречным ($N-N$ или $S-S$) включениями. Для магнитной системы предусмотрена возможность изменения конфигурации и параметров магнитного поля. Несущая среда характеризуется магнитной восприимчивостью, скоростью потока, вязкостью,

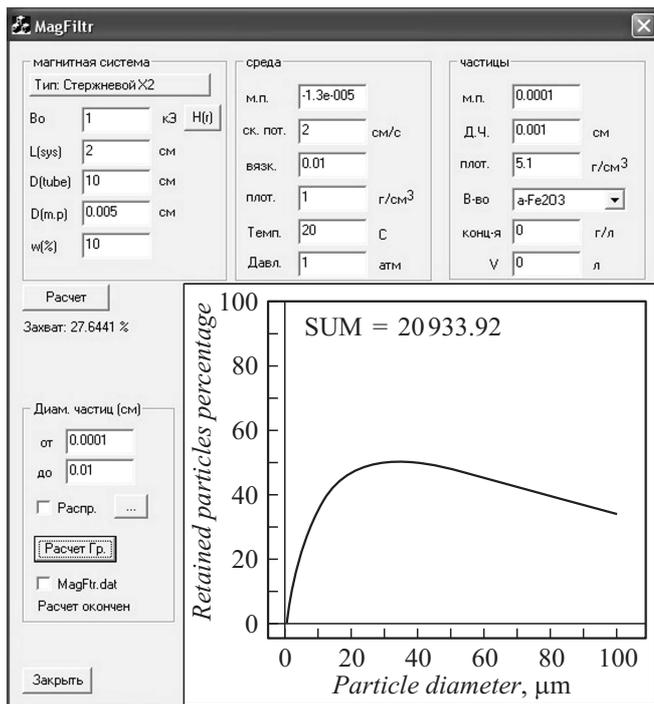


Рис. 1. Главное окно программного пакета „MagFiltr“.

плотностью, температурой и давлением. Удерживаемые частицы — магнитной восприимчивостью, плотностью и эффективным диаметром.

На рис. 1. показано окно с интерфейсом пользователя программного пакета „MagFiltr“. В верхней части окна расположены поля, предназначенные для ввода параметров магнитной системы, среды и удерживаемых частиц. Ниже этих полей находятся элементы управления программой, позволяющие выполнять численное моделирование процесса удерживания в соответствии с заданными параметрами и поле вывода результатов. Результаты работы программы отображаются в виде значения доли удержанных частиц в поле „Захват“ или в виде графика зависимости доли удержанных частиц от их размера, расположенном в поле вывода графика. Предусмотрена возможность определения профиля распределения эффективности удерживания частиц от их размеров, прошедших через фильтр с заданным распределением частиц, входящих в фильтр.

Выбор типа магнитной системы и ее характеристик осуществляется в окне настройки магнитной системы (рис. 2), вход в которое осуществляется нажатием кнопки „Тип“ в главном окне. К характеристикам магнитной системы относятся геометрические размеры входящих в нее магнитов, их остаточная намагниченность и способ включения, геометрические размеры самой системы, диаметр элементов матрицы и доля заполнения матрицей рабочего объема фильтра.

Выбор способа включения магнитов относительно проходящего потока среды осуществляется с помощью

окна „Тип системы“. Возможен выбор из трех вариантов системы: „Лабиринтный“, „Стержневой“ и „Стержневой X2“. „Лабиринтный“ тип предназначен для моделирования системы с последовательным включением магнитов ($S-N$). При этом поток с удерживаемыми частицами проходит между магнитами, создающими магнитное поле, направленное перпендикулярно потоку. В „Стержневой“ и „Стержневой X2“ системах магниты расположены полюсами навстречу друг к другу ($S-S$ или $N-N$). В данном случае магнитное поле „выталкивается“ в проходящий поток. Таким образом, максимальная величина поля возникает около магнита и быстро убывает по ширине (диаметру) системы. В типе „Стержневой X2“ магниты находятся с двух сторон магнитной системы и моделируют ситуацию, когда магнитное поле „выталкивается“ к центру системы. Ввод остаточной намагниченности магнитов осуществляется в окне „Bo“. Геометрические параметры магнита определяются: длиной магнита (окно „L mag“), высотой магнита (окно „hM“, для лабиринтного типа высота магнита равна длине магнитной системы), расстоянием между магнитами при встречном включении (окно „dM“). К геометрическим размерам магнитной системы относятся: длина системы (окно „L(sys)“) и диаметр системы (окно „D tube“). Тип матрицы определяется в окне „Нап“. Тип „точки“ — элементы матрицы представлены в виде равноудаленных друг от друга сферических частиц диаметром, заданным в окне „D (m.p)“. Тип „прут“ — элементами матрицы служат цилиндры с диаметром, заданным в окне „D (m.p)“. Ввод доли матрицы от общего объема магнитной системы осуществляется в окне „w(%)“. На рис. 3 приведены основные этапы алгоритма работы программного пакета MagFiltr.

На основании результатов моделирования в качестве базовых вариантов конфигурации были выбраны лабиринтная и стержневая магнитные системы фильтра (рис. 4). В процессе определения технических характеристик ВГМФ параметры магнитных полей выбирались исходя из технических характеристик магнитов, которые выпускаются промышленностью, а параметры среды

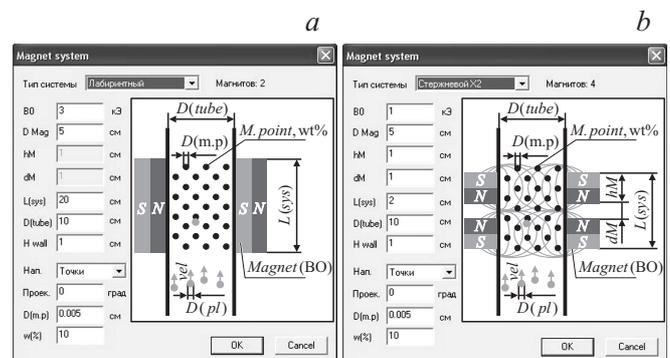


Рис. 2. Окно для выбора типа магнитной системы и задания ее параметров (a — лабиринтная, b — стержневая).

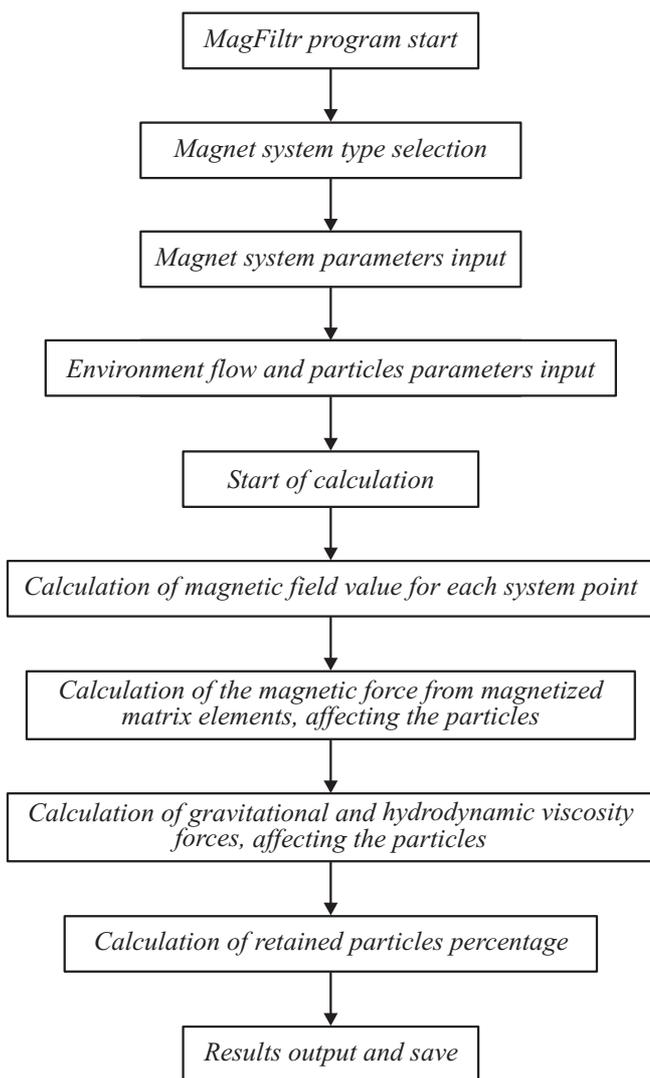


Рис. 3. Алгоритм работы программного пакета MagFiltr.

исходя из значений. Это относится к скоростям потоков, размерам частиц, размерам матричных элементов и т. д.

Далее приведены результаты расчетов основных характеристик высокоградиентных магнитных фильтров с различными магнитными системами, полученные с использованием расчетного кода „MagFiltr“ (рис. 5). В качестве фиксированных параметров приняты: напряженность внешнего магнитного поля — 2 кОе, скорость потока — ~ 100 м/ч, диаметр элементов матрицы — $50 \mu\text{m}$. Расчеты выполнялись для частиц сферической формы. Такое приближение позволяет пренебречь фактором анизотропии и не искажает сути рассматриваемого процесса. На рис. 5 приведены семейства кривых, показывающих долю удерживания частиц в градиентном магнитном поле, образованном магнитными системами различного типа.

Расчеты показывают, что для полного удерживания парамагнитных частиц с размерами от $1 \mu\text{m}$ и выше достаточно использовать магниты из сплавов редкозе-

мельных элементов типа SmCo_5 или NdFeB . Анализ полученного семейства кривых на рис. 5 показывает, что лабиринтная система или последовательный набор таких систем с различной величиной магнитного поля могут быть эффективно использованы не только для удерживания частиц, но и для магнитной сепарации их по размерам. Чем больше размер частиц, тем меньше магнитное поле требуется для полного их удержания и тем более крутой скачок имеет кривая удерживания. Магнитная система стержневого типа более эффективно удерживает парамагнитные частицы различного размера и для их удерживания нужны меньшие величины магнитного поля.

Следующим важным параметром, влияющим на эффективность работы высокоградиентного магнитного фильтра, являются геометрические размеры матричных элементов. На рис. 6 приведены данные, характеризующие изменение доли удерживания частиц различного диаметра при изменении размера матрицы.

Характер изменения данных подтверждает высокую эффективность применения лабиринтной системы для магнитной сепарации. В этом случае можно последовательно располагать наборы матричных элементов с изменяющимися характеристиками и сепарировать частицы на фракции различного размера. Для стержневой системы зависимость не носит скачкообразного характера, однако при одних и тех же величинах напряженности магнитного поля процесс удерживания частиц более эффективен по сравнению с лабиринтной системой.

На рис. 7 приведены результаты расчета доли удерживания парамагнитных частиц в зависимости от скорости течения среды. Например, для лабиринтной магнитной системы при скорости потока ~ 100 м/ч эффективно удерживается большая часть частиц рассматриваемого диапазона размеров. Заметное снижение удерживания частиц в данном потоке происходит только для частиц с размерами от единиц микрон и ниже. В случае применения магнитной системы стержневого типа влияние

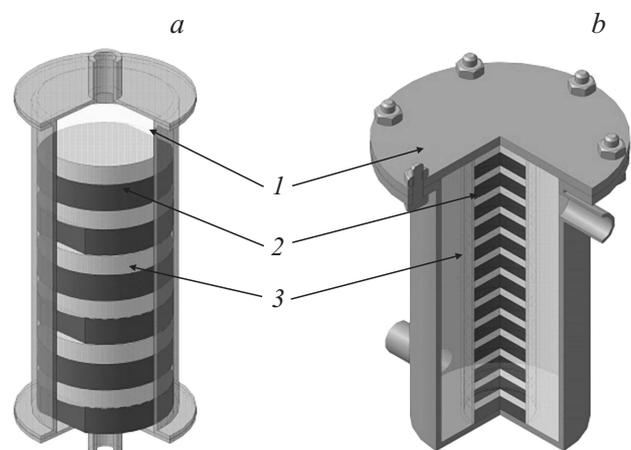


Рис. 4. ВГМФ лабиринтного (а) и стержневого (б) типов. 1 — корпус, 2 — магниты, 3 — матрица.

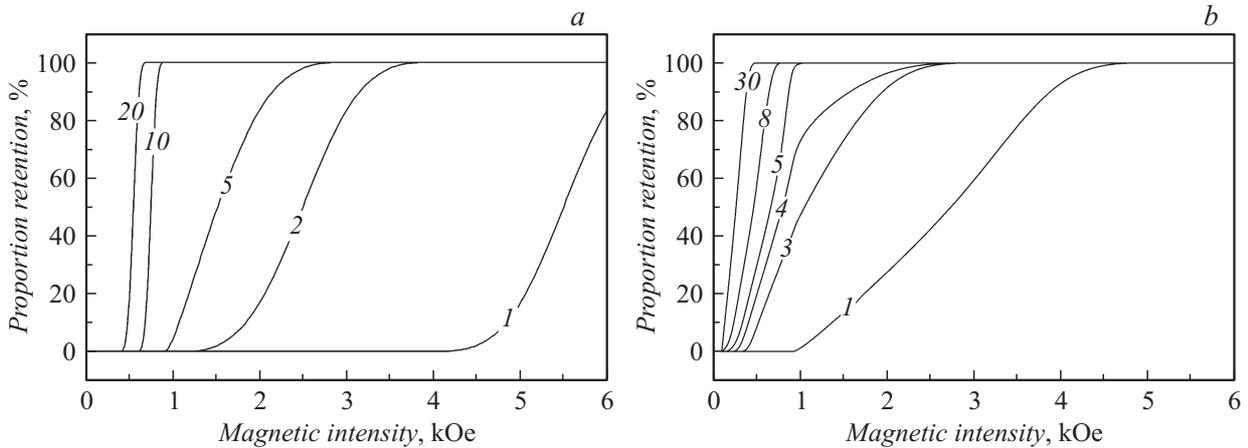


Рис. 5. Зависимость удерживания частиц от напряженности внешнего магнитного поля (*a* — лабиринтная система, *b* — стержневая система). Цифрами на кривых указан диаметр удерживаемых частиц ($\mu\text{м}$).

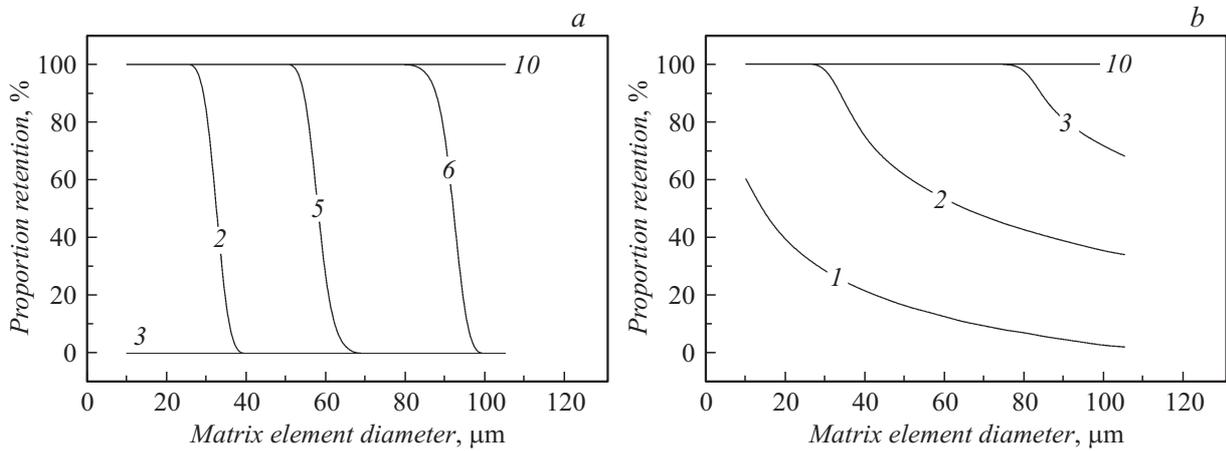


Рис. 6. Влияние диаметра матричного элемента на удерживание парамагнитных частиц (*a* — лабиринтная и *b* — стержневая системы). Цифрами на кривых указан диаметр удерживаемых частиц ($\mu\text{м}$).

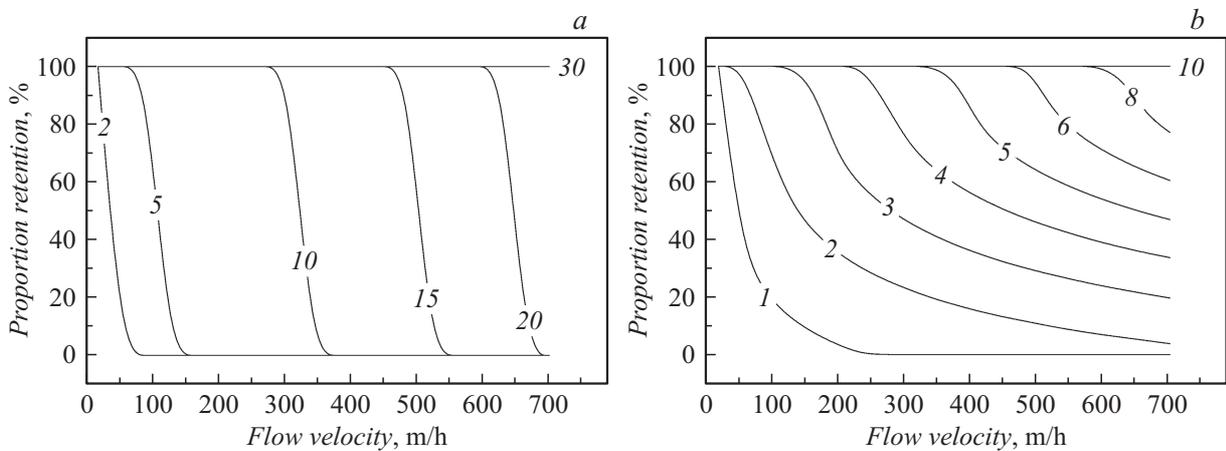


Рис. 7. Влияние скорости потока на удержание частиц для магнитных систем лабиринтного — *a* и стержневого — *b* типов. Цифрами на кривых указан диаметр удерживаемых частиц ($\mu\text{м}$).

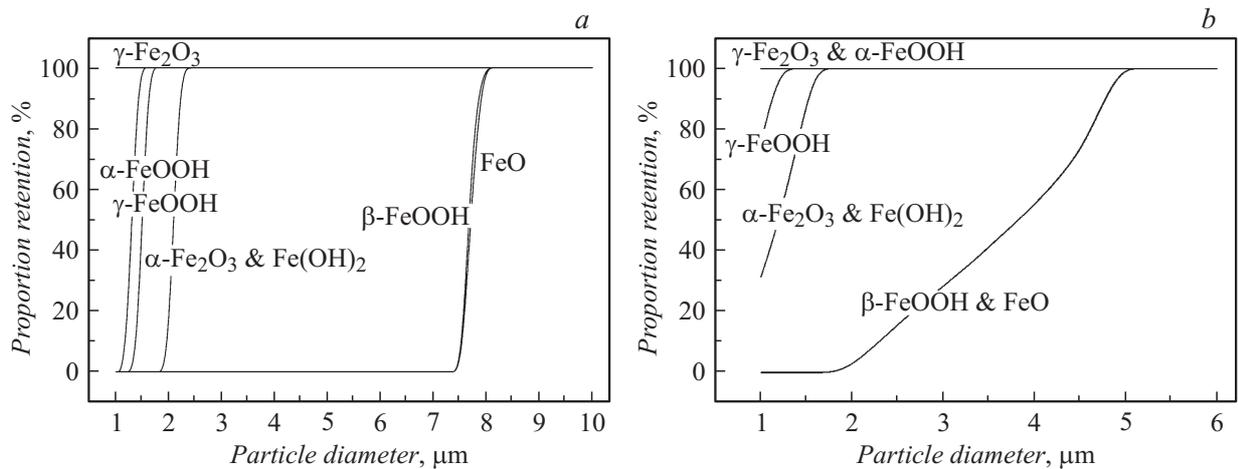


Рис. 8. Удерживание частиц с различными магнитными свойствами и размерами для магнитной системы лабиринтного (а) и стержневого (b) типов.

скорости потока на процесс удерживания частиц не носит такого резкого характера. Следует отметить, что удержание частиц в случае стержневой магнитной системы более эффективно. Например, удержание частиц диаметром $10\ \mu\text{m}$ практически полностью прекращается при скорости потока $360\ \text{m/h}$ для системы лабиринтного типа (рис. 7, а), в то же время в системе стержневого типа частицы размером $10\ \mu\text{m}$ практически полностью удерживаются при скорости потока вдвое выше ($20\ \text{cm/s}$). Таким образом, в системе стержневого типа более сильно проявляются и процесс захвата частиц, и процесс их удержания.

Расчет эффективности высокоградиентной магнитной фильтрации для частиц различного фазового состава и размеров приведен на рис. 8

Удерживание немагнитных частиц FeO и $\beta\text{-FeOOH}$ для стержневой магнитной системы начинается с размера $2\ \mu\text{m}$ и растет с увеличением размера. В то же время в лабиринтной системе удерживание этих частиц начинается с размера $7.5\ \mu\text{m}$ и быстро достигает 100%. Для ферромагнетиков параметры удерживания для магнитных систем обоих типов практически не отличаются.

На рис. 9 и 10 приведены данные о влиянии величины напряженности внешнего магнитного поля и скорости фильтрации на эффективность очистки воды бассейна выдержки (БВ) облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) реактора водо-водяного типа от парамагнитных частиц $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, полученные в процессе опытной эксплуатации ВГМФ лабиринтного и стержневого типа. Следует отметить, что после достижения определенной для каждой магнитной системы напряженности внешнего магнитного поля наблюдается независимость эффективности захвата парамагнитных частиц в объеме ВГМФ от напряженности внешнего магнитного поля. Ранее полученные данные по определению эффективности очистки модельных суспензий парамагнитных частиц на макете ВГМФ со сверхпроводниковой магнитной

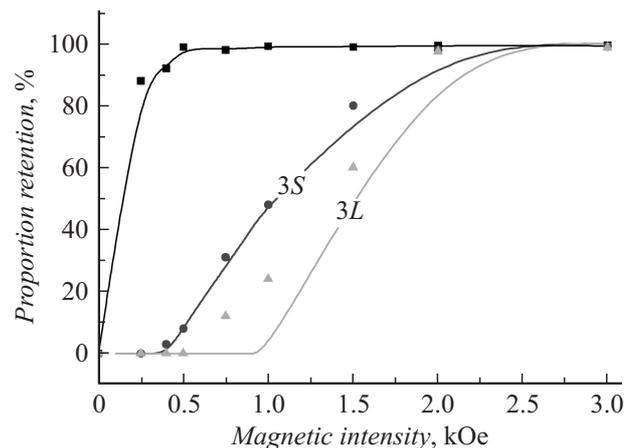


Рис. 9. Зависимость эффективности работы ВГМФ с лабиринтной и стержневой магнитными системами от напряженности внешнего магнитного поля.

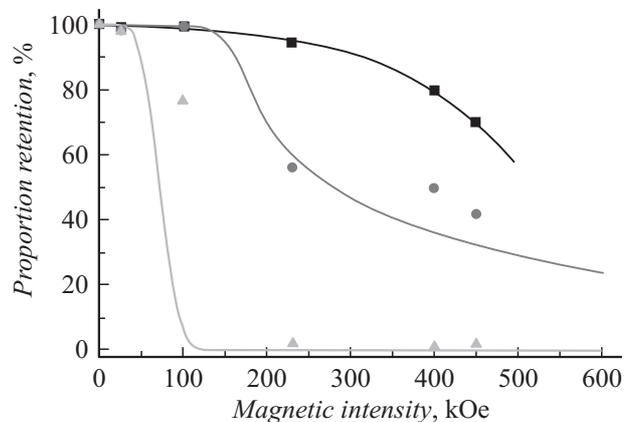


Рис. 10. Зависимость эффективности работы ВГМФ с лабиринтной и стержневой магнитными системами от скорости фильтрации.

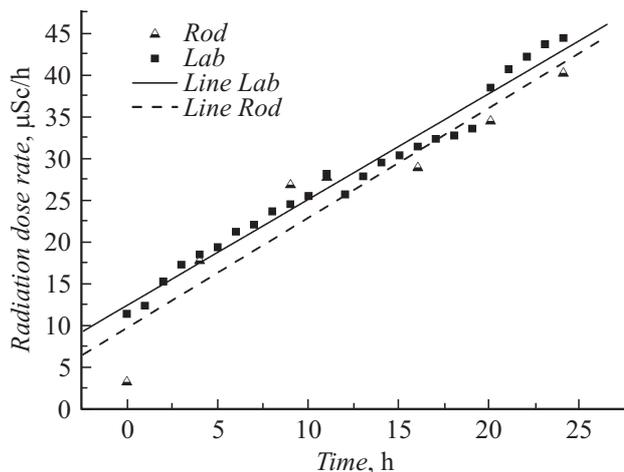


Рис. 11. Изменение мощности дозы от корпусов ВГМФ стержневого и лабиринтного типов в процессе очистки воды бассейна выдержки ОТВС.

системой удовлетворительно совпадают с расчетными данными для других типов магнитных систем.

На основании полученных данных разработаны опытные образцы ВГМФ с лабиринтной и стержневой магнитными системами для очистки технологических сред атомных энергетических установок от активированных продуктов коррозии. Результаты очистки воды БВ ОТВС реактора водо-водяного типа от АПК высокоградиентными магнитными фильтрами с различными магнитными системами приведены на рис. 11. Фазовый состав АПК, определенный методом мессбауэровской спектроскопии, практически на 100% определяется лепидокритом. Дисперсный состав взвесей АПК в основном определяется частицами размером $1-10 \mu\text{m}$ ($\sim 70\%$). Химический состав взвесей АПК: Fe $\approx 69\%$, Cr $\approx 17\%$, Ni $\approx 7\%$, Mn $\approx 4\%$. Радионуклидный состав более чем на 90% определяется Co-60 и Mn-54. Исходная концентрация продуктов коррозии (в пересчете на железо) в воде БВ составляла менее $20 \mu\text{g/kg}$.

Сравнение результатов показывает практически одинаковую эффективность высокоградиентных магнитных фильтров с магнитными системами различного типа при очистке воды бассейнов выдержки ОТВС от парамагнитной фазы продуктов коррозии. Следовательно, выбор технических решений при разработке конструкции ВГМФ должен определяться конкретными задачами: например, оборудование, постоянно работающее в системе очистки, одноразовый фильтр-патрон и т. д.

Приведенные в работе данные подтверждают корректность математической модели, используемой при разработке программного расчетного кода, и работоспособность высокоградиентных магнитных фильтров, разработанных на основании расчетных данных, что позволяет рекомендовать их для удаления из технологических водных сред продуктов коррозии широкого спектра дисперсного и фазового составов.

Список литературы

- [1] Морозова И.К., Громова А.И., Герасимов В.В. и др. Вынос и отложения продуктов коррозии реакторных материалов. М.: Атомиздат, 1975.
- [2] Ефимов А.А., Москвин Л.Н., Белозерский Г.Н. и др. // Атомная энергия. 1989. Т. 67. Вып. 6. С. 389–392.
- [3] Седов В.М., Крутиков П.Г., Константинов Е.А. и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. № 1. С. 23–28.
- [4] Брусов К.Н., Крутиков П.Г., Осминин В.С., Чекмарев А.М. Продукты коррозии в контурах атомных станций. М.: Энергоатомиздат. 1988.
- [5] Москвин Л.Н., Ефимов А.А., Варовин И.А. и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 1. С. 28–32.
- [6] Гусев Б.А., Ефимов А.А., Ларина Р.С. и др. // Атомная энергия. 1988. Т. 64. Вып. 1. С. 69–71.
- [7] Гусев Б.А., Ефимов А.А., Москвин Л.Н. и др. // Атомная энергия. 1991. Т. 70. Вып. 6. С. 412–413.
- [8] Черемных П.А. Магнитная сепарация (обзор). М.: ИАЭ, 1977.